

# **CO<sub>2</sub>-Tonnagen und Wärmespeichereffekte über den Lebenszyklus von Mehrfamilienhäusern (MFH)**

**Kurzstudie**

---





## Kurzstudie

Projekt	<b>CO2-Tonnagen und Wärmespeichereffekte über den Lebenszyklus von Mehrfamilienhäusern (MFH)</b>
beauftragt durch	Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. Dr.sc.techn. Ronald Rast Kochstraße 6-7 10969 Berlin
ausführende Stelle	LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH Dr.-Ing. Sebastian Pohl Berliner Allee 58 64295 Darmstadt

**Darmstadt, 20. November 2017**

**Dr.-Ing. Sebastian Pohl**

---



**LCEE** LIFE CYCLE ENGINEERING EXPERTS GMBH



## **Inhaltsverzeichnis**

- 1 LCEE-Studienreihe Nachhaltigkeit im Wohnungsbau**
- 2 Simulative Quantifizierung von Wärmespeichereffekten**
- 3 Ökobilanzielle Abbildung von Wärmespeichereffekten**
- 4 Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Tonnagen über den Lebenszyklus**
- 5 Zusammenfassung**

**Literaturverzeichnis**

---

## 1 LCEE-Studienreihe Nachhaltigkeit im Wohnungsbau

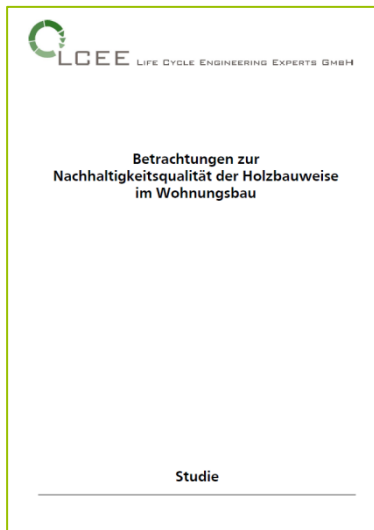


Abb. 1: Band IV der LCEE-Studienreihe [4]

Eine Analysevariation bestand in der Analyse und Bewertung eines 80-Jahre-Lebenszyklus.

### Studienkontext

In den Jahren seit 2012 wurde durch die LCEE eine umfassende Studienreihe zur Nachhaltigkeitsqualität marktgängiger Bauweisen im deutschen Wohnungsbau erarbeitet ([1]-[4]; siehe exemplarisch Abb. 1).

Methodische Basis dabei war die systematische Anwendung von Kriterien des *Deutschen Gütesiegels Nachhaltiges Bauen (DGNB)* u.a. auf ein repräsentatives Typengebäude aus dem Mehrfamilienaus-Segment als sog. Muster-MFH (siehe Abb. 2).

Entsprechend war eine norm- und DGNB-konforme ökobilanzielle Analyse und Bewertung des Muster-MFH über einen Gebäudelebenszyklus von 50 Jahren bzw. deren funktionell äquivalenten Ausführungsvarianten in Mauerwerk (Ziegel, Kalksandstein sowie Poren- und Leichtbeton), Stahlbeton- und Holzbauweise elementarer Bestandteil der Studienreihe (inkl. einer unabhängigen externen Prüfung der Ökobilanzierungen und gesamten Studien(-reihe)).



Abb. 2<sup>1</sup>: Musterhaus *Typengebäude MFH* aus [3][4] (vgl. auch [5])

### Zielsetzung der Kurzstudie

Ein zentrales Ergebnis dieser ökobilanziellen Analyse und Bewertung war, dass die Gesamtergebnisse bzw. -umweltwirkungen des Muster-MFH über dessen Lebenszyklus ganz maßgeblich von den Energieverbräuchen der Nutzungsphase (Wärme, Strom) bestimmt werden. Dabei wurden das Muster-MFH bzw. seine funktionell äquivalenten Ausführungsvarianten auch energetisch vollständig äquivalent modelliert.

Energetische Äquivalenz im Sinne z.B. des EnEV-Standards bzw. identischer U-Werte.

<sup>1</sup> Bildnachweis: ARGE//eV



Aufgrund seiner größeren Masse und vergleichsweise höheren Trägheit bei Temperaturänderungen ist Mauerwerk eher in der Lage, Wärme aufzunehmen und erst zeitverzögert wieder abzugeben, die Wärme also zu puffern.

In den Ökobilanzen aus [1][3][4] wurden die Ergebnisse pro m<sup>2</sup> Nettogrundfläche (NGF) und Jahr des Gebäudelebenszyklus ausgewiesen.

Faktisch können sich aber trotz energetischer Äquivalenz Unterschiede im Heizenergiebedarf der betrachteten Ausführungsvarianten ergeben, da dieser auch von der Wärmespeicherfähigkeit der verwendeten konstruktiven Baumaterialien beeinflusst wird.

Denn die Beheizung von Massivhäusern unterscheidet sich von derjenigen von Holzhäusern insofern, als die *heizfreien* Zeiträume in den Übergangsphasen zwischen Heizperiode und Nicht-Heizperiode respektive Nicht-Heizperiode und Heizperiode im April respektive Oktober länger sind – mit entsprechenden positiven Auswirkungen auf den Heizenergiebedarf [6].

Die vorliegende Kurzstudie soll diesen Effekt für das Muster-MFH aus [3][4] bzw. die modellierten Ausführungsvarianten ökobilanziell quantifizieren und in Form absoluter CO<sub>2</sub>-Tonnagen für das gesamte Muster-MFH und über den gesamten Lebenszyklus ausweisen.

## 2 Simulative Quantifizierung von Wärmespeichereffekten



Abb. 3: Energie-simulative Studie zum Muster-MFH [6]

### Thermischer Komfort

### Temperaturverhalten

### Energie-simulative Studien zum Muster-MFH

Im Rahmen eines Beratungsmandats zur Verbesserung des thermischen Komforts und zur Energieeinsparung wurde das Muster-MFH aus Abb. 2 mittels einer energetischen Gebäudesimulation modelliert, analysiert und bewertet [6].

Dabei sollte explizit auch untersucht werden, wie sich massive Bauweisen gegenüber der leichteren Holzbauweise auf das thermische Verhalten auswirken und in diesem Kontext u.a. auch der Heizenergiebedarf durch die Wärmespeicherung in massiven Bauteilen beeinflusst wird.

In der Studie wurde in Analogie zur eigenen Studienreihe die für das MFH-Segment marktrelevanten Bauweisen Mauerwerk (Ziegel, Kalksandstein sowie Poren- und Leichtbeton), Stahlbeton- und Holzbau abgebildet.

### Simulationsergebnisse im Überblick

In allen Bauweisen des Muster-MFH kann der thermische Komfort sowohl im Winter als auch im Sommer grds. sichergestellt werden. Gleichwohl ist der thermische *Komfort der Massivhäuser* faktisch *besser* zu bewerten, weil im Sommer dort geringere Überhitzungshäufigkeiten und Spitzen-Raumtemperaturen feststellbar sind.

Aufgrund der größeren thermischen Speicherfähigkeit der Bauteile ist das thermische Verhalten der Massivhäuser insgesamt stabiler als beim Holzhaus, im einzelnen weil

- ▶ die Temperaturschwankungen geringer ausfallen,
- ▶ insbesondere eine Überhitzung weniger schnell eintritt
- ▶ und somit eine höhere (thermische) Trägheit des Gebäudes vorliegt





## Heizung

Ferner sind in den Massivhäusern des Muster-MFH auch die Spitzen-Heizleistungen um im Durchschnitt 10 % geringer als im Holzhaus (vgl. Tab. 1).

Die einleitend skizzierten Unterschiede in der Beheizung von Massiv- und Holzhäusern in den Übergangsphasen von Heizperiode/Nicht-Heizperiode führen freilich auch zu Unterschieden im Heizenergiebedarf. Je nach Mauerwerksbauweise liegen die entsprechenden Reduzierungen des Heizenergiebedarfs für das Muster-MFH bei bis zu 9 % (im Durchschnitt: 8,5 %) bezogen auf das Holzhaus als Referenzfall und Bezugspunkt (vgl. Tab. 1).

Ausführungsvariante	Heizenergiebedarf		Spitzenheizleistungen	
	absolut [MWh]	Abweichung zu Referenz	absolut [kW]	Abweichung zu Referenz
Holz (Referenz)	30,3	± 0 %	19,2	± 0 %
Mauerwerk (Durchschnitt)	27,8	- 8,5 %	17,28	- 10 %
Stahlbeton	28,8	- 5 %	18,0	- 6 %

**Tab. 1: Durchschnittliche Wärmespeichereffekte des Mauerwerks im Muster-MFH [6]**



### 3 Ökobilanzielle Abbildung von Wärmespeichereffekten

#### Ökobilanzielle Abbildung der Nutzungsphase

Wie einleitend beschrieben stellen die Umweltwirkungen der Nutzungsphase den ganz wesentlichen Teil der Gesamt-Umweltwirkungen über den Gebäudelebenszyklus dar.

Zu deren Berechnung werden die Endenergiebedarfswerte je Energieträger gemäß EnEV rechenstechnisch gekoppelt mit den entsprechenden ökobilanziellen Basisdaten an Umweltwirkungen je Energieträger (etwa kg CO<sub>2</sub> je kWh Strom, Erdgas, etc.). Dabei erfolgt der Ergebnisausweis gemäß Vorgaben des DGNB normiert auf bzw. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr.

Im Rahmen der Studien aus [3][4] ergaben sich wegen der energetisch funktionellen Äquivalenz der betrachteten Ausführungsvarianten des Muster-MFH jeweils absolut identische ökobilanzielle Ergebnisse der Nutzungsphase.

#### Berücksichtigung von Wärmespeichereffekten

Gemäß Darstellung in Kapitel 2 führt das thermische Verhalten, konkret das Wärmespeichervermögen, der massiven Ausführungsvarianten zu einer Reduzierung des Heizenergiebedarfs (vgl. Tab. 1).

Diese prozentualen Reduzierungsfaktoren können in die soeben skizzierte Berechnungsmethodik der Ökobilanz der Nutzungsphase implementiert werden, indem die Endenergiebedarfswerte um den entsprechenden Prozentsatz verringert werden – allerdings nur diejenigen, die unmittelbar mit dem Heizen, d.h. der thermischen Raumkonditionierung, in Verbindung stehen.

Entsprechend wurde auch die Anlagentechnik und Energieversorgung der Ausführungsvarianten äquivalent (= identisch) modelliert.

Ökobilanzierung der Konstruktion über den Lebenszyklus bleibt gänzlich unverändert gegenüber [1][3][4].

Demnach nicht: z.B. Endenergiebedarf Trinkwarmwasser

## 4 Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Tonnagen über den Lebenszyklus

### Umrechnung der DGNB-Ergebnisse in CO<sub>2</sub>-Tonnagen

Gemäß Kurzbeschreibung unter Kapitel 3 wurden die Ökobilanz-Ergebnisse der Studienreihe aus [1]-[4] bisher DGNB-konform normiert auf den bzw. pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr bestimmt und ausgewiesen.

Nachfolgend soll der Ergebnisausweis abweichend davon als CO<sub>2</sub>-Tonnage für das gesamte Muster-MFH über den kompletten Gebäudelebenszyklus – mithin pro 50 und alternativ 80 Jahre (siehe Ausführungen in Kapitel 1) – erfolgen.

Dadurch sollen die Ergebnisse besser einordbar und vergleichbar gemacht werden, z.B. auch mit Blick auf andere „Referenzwerte“ für Umweltwirkungen bzw. CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke wie etwa den Pro-Kopf-Ausstoß an CO<sub>2</sub> in Deutschland.

Dazu sind die Ökobilanz-Ergebnisse pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr aus Kapitel 3 lediglich mit den Gesamt-m<sup>2</sup> NGF des Muster-MFH aus Abb. 2 sowie der Jahresanzahl des Gebäudelebenszyklus (50 und alternativ 80 Jahre) zu multiplizieren und auf die Gewichtseinheit Tonne (t) umzurechnen.

### CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch Speichereffekte im Massivbau

Die entsprechenden Ergebnisse dieser „Umrechnung“ aus Tab. 2 f. sowie Abb. 4 f. verdeutlichen zunächst, dass zwischen den Ausführungsvarianten eines durchschnittlichen Mauerwerks und der Holzbauweise in der Herstellungsphase erhebliche Unterschiede in den verursachten CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bestehen. Dies ist damit zu begründen, dass Holz und Holzwerkstoffe in den ökobilanziellen Basisdaten als CO<sub>2</sub>-Senke modelliert sind, was die CO<sub>2</sub>-Speicherwirkung der Materialausgangsgestalt eines Baumes widerspiegelt.

Diese Unterschiede aus der Lebenszyklusphase der Herstellung nivellieren sich aber über den gesamten Lebenszyklus betrachtet (vollständig) ein.

Jede Person „verursacht“ in Deutschland pro Jahr ca. **10 Tonnen** CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Stahlbetonbauweise als weitere Ausführungsvariante für MFH weist generell die höchsten CO<sub>2</sub>-Äquivalente für Herstellung, Nutzung (Erneuerung) und Summe Lebenszyklus auf.



Denn erstens wird in der Lebenszyklusphase des End of Life die CO<sub>2</sub>-Speicherwirkung des Holzes/der Holzwerkstoffe umgekehrt, weil bei der thermischen Verwertung (= Verbrennung) von Holz/Holzwerkstoffen das gespeicherte CO<sub>2</sub> wieder frei wird.

Und zweitens verursacht die Ausführungsvariante der Holzbauweise in der Betriebsphase wegen der gegenüber massiven Ausführungsvarianten geringeren Wärmespeichereffekte deutlich mehr CO<sub>2</sub>.

Insgesamt beträgt die prozentuale/absolute „Einsparung“ bei den CO<sub>2</sub>-Tonnagen über 50 Jahre für das Muster-MFH in Holz gegenüber dem Durchschnitts-Mauerwerk nur noch - 2,4 %/- 17 t.

Für eine Betrachtung von 80 Jahren kehren sich die Ergebnisse sogar um: mit dem Durchschnitts-Mauerwerk lassen sich prozentual/absolut gegenüber der Holzbauweise für das Muster-MFH - 3,4 %/- 33 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente „einsparen“.

Zum Vergleich: Dies entspricht über 50 Jahre dem, was weniger als 2 Personen in Deutschland jedes Jahr an CO<sub>2</sub> verursachen.

#### Fazit

Letztlich bestätigt sich damit nochmals die ökobilanzielle respektive die ökologische Nachhaltigkeitsqualität betreffende Kernaussage der Studien aus [3][4] bzw. der gesamten Studienreihe aus [1]-[4], wonach für die ökologische Nachhaltigkeitsqualität primär *nicht* die Bauweise entscheidend ist, sondern die energetische Qualität eines Gebäudes und seiner Konstruktionen und Bauteile.

Wobei nach Sach- und Ergebnislage dieser Kurzstudie als fortgeschriebenes Fazit zu ergänzen ist, dass eben diese energetische Qualität – im Sinne von ökobilanziell wirksamen Wärmespeichereffekten – in massiven Wohngebäuden aus Mauerwerk höher ist als diejenige von Wohngebäuden in Holzbauweise.



<b>CO2-Äquivalente absolut<sup>*)</sup> in Tonnen (t)</b>					
*) für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m <sup>2</sup> ) sowie über gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren					
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus
Muster-MFH-Variante					
Ø Mauerwerk	268,13	68,12	28,92	355,29	720,46
Holzständer MiWo-Dämmung	200,13	67,65	59,52	376,17	703,46
Stahlbeton WDVS/EPS	303,04	78,97	37,23	363,89	783,13

<b>%-Abweichungen CO2-Äquivalente bezogen auf Ø Mauerwerk als Referenzwert*)</b>					
*) für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m <sup>2</sup> ) sowie über gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren					
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus
Muster-MFH-Variante					
Ø Mauerwerk	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holzständer MiWo-Dämmung	-25,4%	-0,7%	105,8%	5,9%	-2,4%
Stahlbeton WDVS/EPS	13,0%	15,9%	28,7%	2,4%	8,7%

<b>Absolute Abweichungen CO2-Äquivalente in Tonnen (t) bezogen auf Ø Mauerwerk als Referenzwert*)</b>					
*) für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m <sup>2</sup> ) sowie über gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren					
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus
Muster-MFH-Variante					
Ø Mauerwerk	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holzständer MiWo-Dämmung	-68,00	-0,48	30,60	20,88	-17,00
Stahlbeton WDVS/EPS	34,91	10,85	8,31	8,60	62,66

**Tab. 2: CO2-Äquivalente Muster-MFH für 50-Jahre-Gebäudelebenszyklus**

<b>CO2-Äquivalente absolut<sup>*)</sup> in Tonnen (t)</b>					
*) für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m <sup>2</sup> ) sowie über gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren					
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus
Muster-MFH-Variante					
Ø Mauerwerk	268,13	117,08	28,92	568,46	982,59
Holzständer MiWo-Dämmung	200,13	154,50	59,52	601,87	1016,02
Stahlbeton WDVS/EPS	303,04	125,48	37,23	582,22	1047,97

<b>%-Abweichungen CO2-Äquivalente bezogen auf Ø Mauerwerk als Referenzwert*)</b>					
*) für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m <sup>2</sup> ) sowie über gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren					
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus
Muster-MFH-Variante					
Ø Mauerwerk	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holzständer MiWo-Dämmung	-25,4%	32,0%	105,8%	5,9%	3,4%
Stahlbeton WDVS/EPS	13,0%	7,2%	28,7%	2,4%	6,7%

<b>Absolute Abweichungen CO2-Äquivalente in Tonnen (t) bezogen auf Ø Mauerwerk als Referenzwert*)</b>					
*) für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m <sup>2</sup> ) sowie über gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren					
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus
Muster-MFH-Variante					
Ø Mauerwerk	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holzständer MiWo-Dämmung	-68,00	37,42	30,60	33,40	33,43
Stahlbeton WDVS/EPS	34,91	8,40	8,31	13,76	65,38

**Tab. 3: CO2-Äquivalente Muster-MFH für 80-Jahre-Gebäudelebenszyklus**

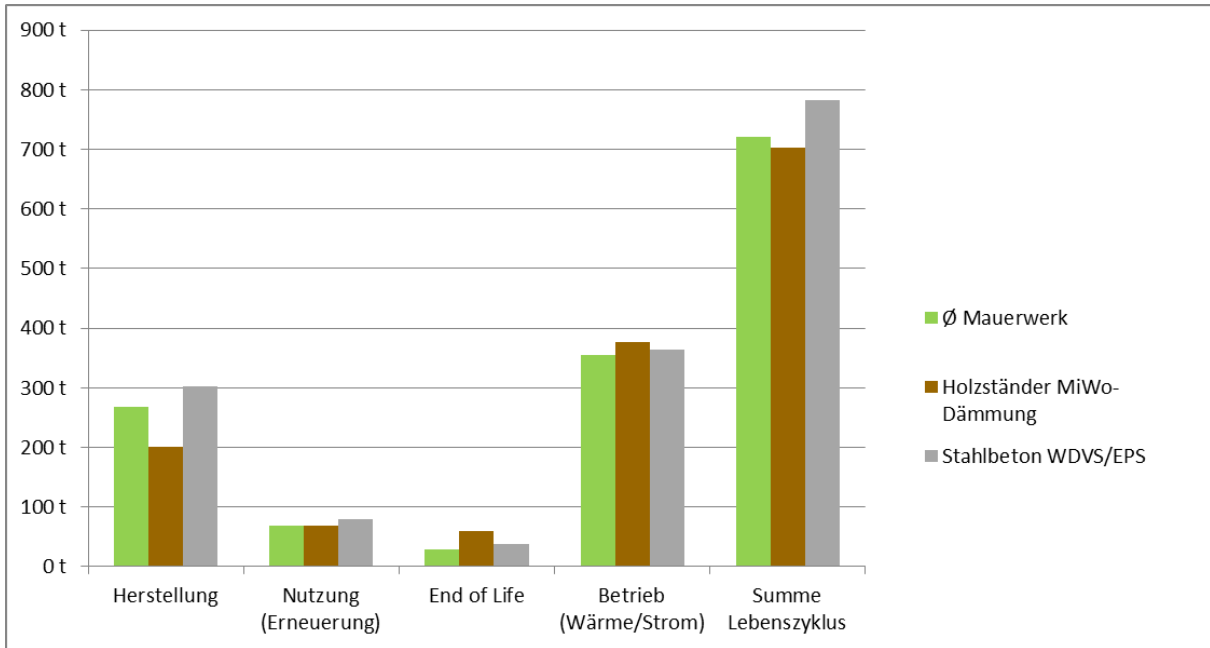


Abb. 4: Absolute CO<sub>2</sub>-Äquivalente in t für Muster-MFH für 50-Jahre-Gebäudelebenszyklus

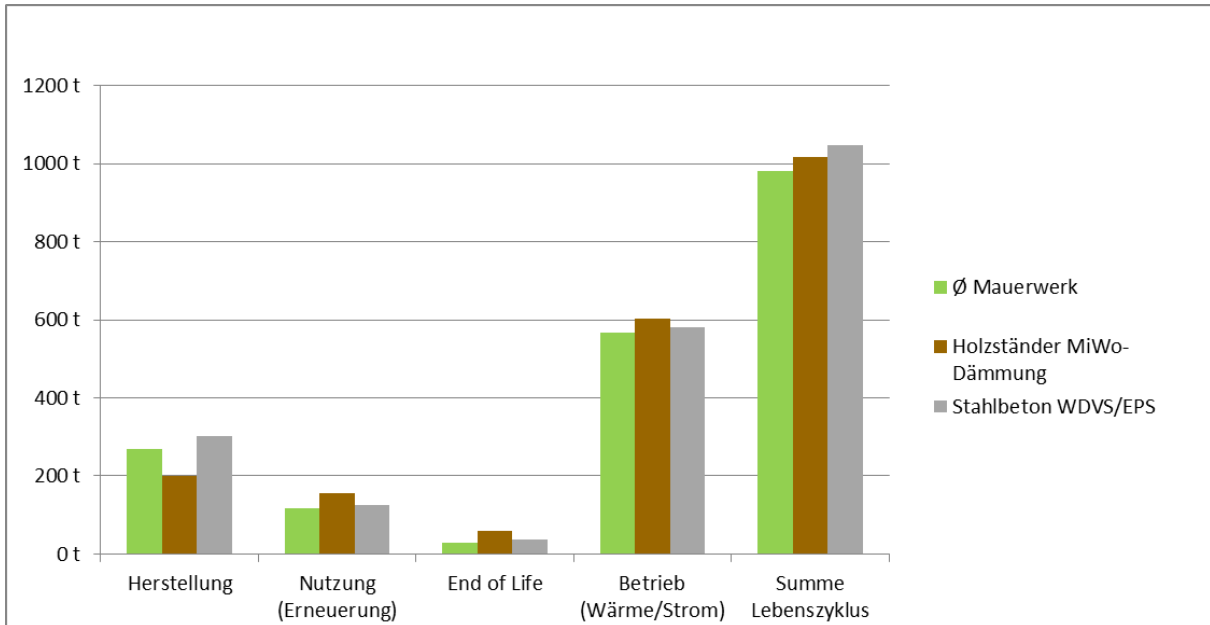


Abb. 5: Absolute CO<sub>2</sub>-Äquivalente in t für Muster-MFH für 80-Jahre-Gebäudelebenszyklus



## 5 Zusammenfassung

### Zielsetzung

Zielsetzung der vorliegenden Kurzstudie war die Quantifizierung derjenigen Effekte, die die Wärmespeicherfähigkeiten von Konstruktionsmaterialien auf die ökobilanziellen Ergebnisse der marktrelevanten Bauweisen Mauerwerk, Stahlbeton- und Holzbauweise haben.

### Ausgangsbasis

Ausgangsbasis der Kurzstudie waren dabei die extern geprüften ökobilanziellen Berechnungen der Studien aus [3][4] für das Muster-MFH aus Abb. 2, die bisher keine Wärmespeichereffekte der funktionell – d.h. insbesondere auch energetisch – äquivalenten Ausführungsvarianten des Muster-MFH umfassten.

Die Ergebnisse der energetischen Gebäudesimulation aus [6] zum thermischen Verhalten des Muster-MFH in unterschiedlichen Bauweisen zeigen aber, dass zwischen den massiven Ausführungsvarianten in Mauerwerk und der in Holzbauweise aufgrund unterschiedlicher Wärmespeicherfähigkeiten nennenswerte Unterschiede in den Heizwärmebedarfen bestehen, die sich auch ökobilanziell signifikant niederschlagen (müssen). Denn die ökobilanziellen Gesamtergebnisse über den Gebäudelebenszyklus werden entscheidend von den Energiebedarfen der Nutzungsphase bestimmt.

### Ergebnisse

Über 50 Jahre: Muster-MFH Holz verursacht gegenüber Mauerwerk 2,4 % bzw. 17 t weniger CO<sub>2</sub>.

Über 80 Jahre: Muster-MFH Holz verursacht gegenüber Mauerwerk 3,4 % bzw. 33 t mehr CO<sub>2</sub>.

Die Ergebnisse der Tab. 2 f. sowie der Abb. 4 f. machen deutlich, dass die ökobilanziellen Nachteile des Mauerwerks in der reinen Herstellungsphase gegenüber Holz als kurzfristigem biogenen CO<sub>2</sub>-Speicher über einen Gebäudelebenszyklus von 50 Jahren nahezu vollständig kompensiert werden. Über einen realitätsnäheren Gebäudelebenszyklus von 80 Jahren kann das Mauerwerk die höheren Umweltwirkungen der Herstellungsphase sogar deutlich überkompensieren und „spart“ CO<sub>2</sub>-Äquivalente gegenüber der Holzbauweise ein.

Insofern können die zentralen Ergebnisse der Studienreihe aus [1]-[4] bestätigt werden, wonach die ökologische Nachhaltigkeitsqualität primär *nicht* durch die Bauweise bestimmt wird, sondern die energetische Qualität eines Gebäudes und seiner Konstruktionen und Bauteile.



## Literaturverzeichnis

- [1] Graubner, C.-A., Pohl, S.: Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2013
- [2] Graubner, C.-A., Pohl, S.: Nachhaltigkeit von mehrgeschossigen Wohngebäuden aus Mauerwerk. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2014
- [3] Pohl, S.: Nachhaltigkeit von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau. LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH, Darmstadt 2016
- [4] Pohl, S.: Betrachtungen zur Nachhaltigkeitsqualität der Holzbauweise im Wohnungsbau. LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH, Darmstadt 2017
- [5] ARGE//eV: Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden - Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht, Bauforschungsbericht Nr. 68, Kiel 2015
- [6] Lahme, A.: Mehrfamilien-Typenhaus nach EnEV-2016-Standard in verschiedenen Bauweisen – Beratung zur Verbesserung des thermischen Komforts und zur Energieeinsparung. alware GmbH, Braunschweig 2015





**LCEE** LIFE CYCLE ENGINEERING EXPERTS GMBH